



FYZIKÁLNY MODEL POHONNÉHO SYSTÉMU BALBALL

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Ján Bačík

Tento učebný text vznikol za finančnej podpory projektu KEGA 011TUKE-4/2013. Je určený študentom bakalárskeho a inžinierskeho štúdia študijného programu Automatizácia mechatronických systémov pre výučbu v predmetoch Modely dynamických sústav, Mechatronické výrobné systémy, Riadenie montážnych liniek programovateľnými automatmi, Riadiace a vizualizačné systémy, Riadenie mechatronických výrobných systémov.

NÁZOV: Fyzikálny model dvojosového pohonného systému BALBALL

AUTOR: Ing. Ján Bačík

VYDAVATEĽ: Technická univerzita v Košiciach

ROK: 2015

ROZSAH: 33 strán

VYDANIE: prvé

Rukopis neprešiel jazykovou úpravou.

Za odbornú a obsahovú stránku zodpovedá autor.

Obsah

1	ÚVOD	4
2	Popis fyzikálneho modelu BALBALL	5
2.1	Popis jednotlivých komponentov fyzikálneho modelu BALBALL	6
2.1.1	Power Panel 4PP065	6
2.1.2	Zbernica POWERLINK	7
2.1.3	System V/V modulov X20	8
2.1.4	Meniče ACOPOS micro 100D Servo.....	9
2.1.5	Servomotor 8LVA22.....	11
2.1.6	Ultrazvukový snímač UNAM 18U6903	12
3	Matematický model	13
3.1	Analytický popis sústavy	14
4	Počítačový model systému BALBALLv programe Simulink	19
4.1	Tvorba počítačového modelu	19
4.2	Verifikácia počítačového modelu	21
5	Softvérová podpora fyzikálneho modelu Ballball	22
5.1	Automation Studio.....	22
5.2	PID regulátor	23
5.3	Automation Studio Target To Simulink	25
6	Postup pri realizácii regulácie fyzikálneho modelu BALLBAL.....	27
6.1	Uvedenie kola do pohybu.....	27
6.1.1	Nastavenie siete.....	27
6.1.2	Konfigurácia modulov v PLC	28
6.1.3	Test servomotora	29
6.2	Realizácia PID regulátora.....	31

1 ÚVOD

BALBALL - fyzikálny model dvojosového pohonného systému pre riadenie pohybu balansujúcej loptičky po predpísanej dráhe na pohyblivej rovine s riadiacim systémom na báze PLC je určený pre realizáciu spojitého riadenia mechatronických systémov s dôrazom na možnosť variantností prístupov a riešení zadaných úloh. Predstavuje názorný ucelený prienik všetkých troch základných podsystemov mechatroniky a poskytuje študentom a doktorandom vynikajúcu príležitosť ľahšie pochopiť problematiku riadenia zložitých mechatronických systémov. Na modeli si študenti môžu prakticky overiť teoretické znalosti základov dynamiky systémov, regulácie elektrických pohonov, návrhy rôznych predovšetkým inteligentných metód riadenia nelineárnych systémov a ich realizáciu prostredníctvom riadiacich systémov postavených na báze PLC, ako aj problematiku návrhu a zostavenia projektov vizualizácie technologického procesu.

2 Popis fyzikálneho modelu BALBALL

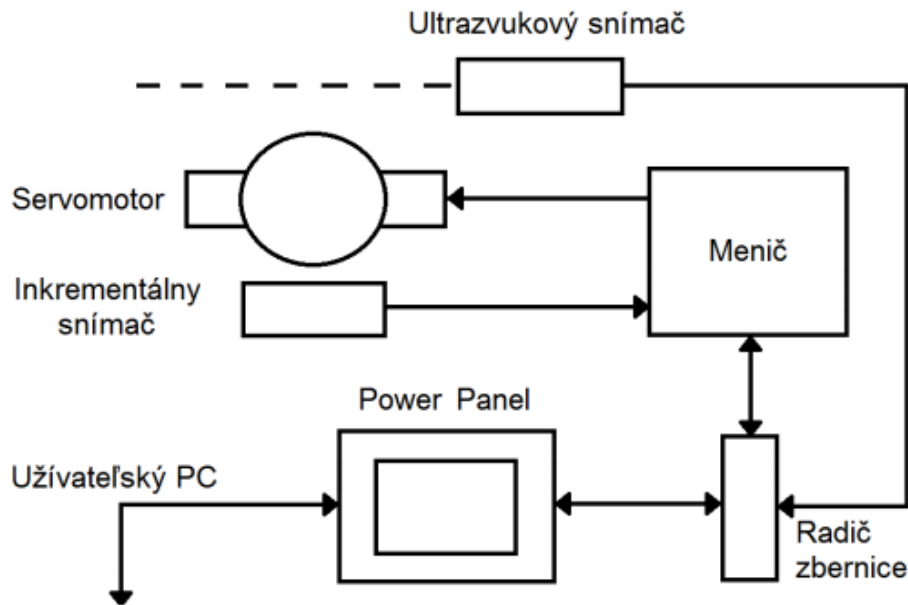
Fyzikálny model BALBALL (Obr. 1) sa skladá z jednosmerného servomotora, ktorý je cez hriadeľ prepojený ku kolesu. Jednosmerný motor je dimenzovaný na 57V. Pri plnom napájacom napätí a použití dvoch napájacích zdrojov s celkovým napätím 50.3 V je jeho maximálna rýchlosť 2650 ot./min. Koleso, po ktorej sa pohybuje loptička má drážku, aby sa zabránilo preklzávaniu loptičky. Fyzikálny model je riadený programovateľným logickým automatom (PLC) a je na ňom umiestnený ultrazvukový snímač, ktorý vysiela vysokofrekvenčné vlny a na základe ich odrazu vie určiť presnú vzdialenosť stanoveného predmetu.



Obr.1 Fyzikálny model BALBALL s riadiacim systémom

Prenos a spracovanie informácií

Prenos a spracovanie informácií fyzikálneho modelu BALBALL: PLC prijíma signál z riadiaceho počítača, ktorý spracuje a posiela do radiča zbernice. Po jeho vyhodnotení ho radič zbernice posiela do meniča, ktorý spracuje prijaté informácie a posiela ich do motora. Motor na základe týchto informácií nastaví požadovanú polohu (pohyb kladným/záporným smerom, zabrzdzenie pohonu,...). Inkrementálny snímač zaznamená vykonanú zmenu a pošle informáciu naspäť do meniča. Menič túto informáciu posiela cez radič zbernice do PLC a nakoniec sa uvedená informácia zobrazuje na obslužnom počítači (rýchlosť otáčania, aktuálna poloha,...). Ultrazvukový snímač zaznamenáva polohu lopty, ktorú posiela do radiča zbernice a ten ju ďalej privádza do PLC. Zapojenie jednotlivých komponentov fyzikálneho modelu BALBALL a smer prenosu informácií je znázornený na Obr.2.



Obr.2 Zapojenie jednotlivých komponentov fyzikálneho modelu BALBALL

2.1 Popis jednotlivých komponentov fyzikálneho modelu BALBALL

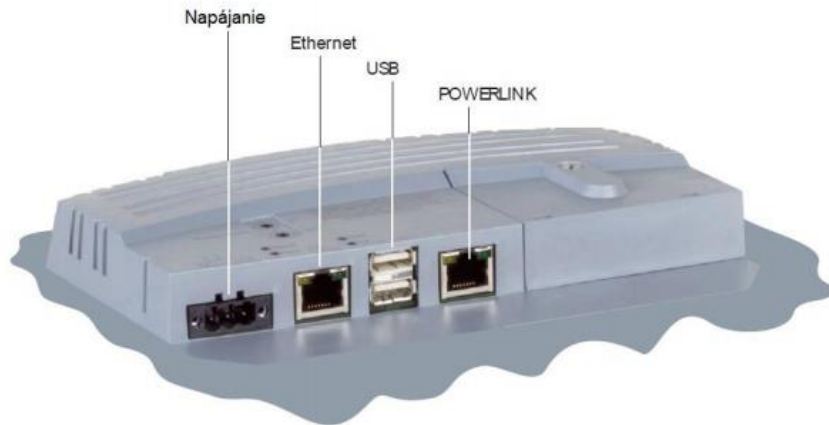
2.1.1 Power Panel 4PP065

Power Panel so sériovým označením 4PP065.0571-P74 od spoločnosti Bernecker & Rainer (Obr. 3) obsahuje odporovú dotykovú obrazovku s QVGA farebným TFT displejom s rozlíšením 320x240 pixelov, na spracovanie údajov využíva 128 MB DRAM, 232 kB SRAM pamäte. Obsahuje jeden CompactFlash slot pre pamäťovú kartu, do ktorej vieme nahráť program, čo nám umožňuje spúšťať aplikácie v programovateľnom automate bez potreby pripojenia užívateľského počítača.



Obr.3 Power Panel 4PP065

Na zadnej strane Power Panelu sa nachádzajú sériové porty (Obr. 4) ako Ethernet 10/100, ktorý využívame na komunikáciu užívateľského počítača s panelom, zbernica Powerlink cez ktorú komunikuje panel s radičom zbernice, 2x USB porty a signalizačné diódy.

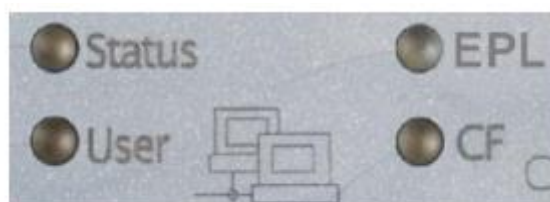


Obr.4 Komunikačné rozhrania Power PanelPP065

Na zadnej strane panela sú umiestnené aj štyri signalizačné diódy (Obr. 5), ktoré svietia nezávisle od seba, podľa typu prevádzky a spôsobu komunikácie:

- dióda Status indikuje, že panel je zapnutý a pripravený k prevádzke,
- dióda User je užívateľsky ovládateľná dióda,
- dióda EPL signalizuje pripojenie užívateľa cez Ethernetový kábel
- dióda CF indikuje prítomnosť Flash pamätevej karty v zariadení a čítaní kódu z nej.

V prípade výskytu nejakej poruchy svieti konkrétna dióda na červeno. Pri normálnom chode je farba diódy zelená.



Obr.5 Signalizačné diódy panela Power PanelPP065

2.1.2 Zbernica POWERLINK

Klasické zbernicové systémy umožňujú automatizáciu produktov od rôznych výrobcov a môžu byť kombinované na základe štandardizovaných technológií. Avšak, obmedzené funkcie často nútia užívateľov používať rôzne zbernicové systémy pre rôzne automatizačné

úlohy. Z tohto dôvodu sa museli používať rôzne nástroje, čo si vyžaduje použitie viacerých modulov a to spôsobuje obmedzenia týkajúce sa diagnostiky a infraštruktúry komponentov.

Preto prišla na trh firma B&R s novým protokolom POWERLINK ako nástupca klasických priemyselných zberníc, poskytuje zásadný výkon a real-time funkcie založené na zavedenom globálnom štandarde, Ethernete. Prenosová rýchlosť je 100 Mbit/s, a presnosť synchronizácie +/- 100 ns, aby sa aj tie najnáročnejšie úlohy v oblasti riadiacej techniky, robotiky, CNC a riadenia pohybu dali kombinovať na jednej sieti.

2.1.3 Systém V/V modulov X20

So systémom V/V modulov X20 B&R stanovuje nové štandardy v súlade s heslom "Perfection in Automation". Tento systém vznikol zo skúseností získaných z automatizačných realizácií systémov B&R po celom svete, početných rozhovorov so zákazníkmi. Cieľom je ľahšie, úspornejšie a bezpečnejšie použitie V/V modulov. Systém X20 je univerzálne riešenie pre každú automatizovanú úlohu strojov a systémov vo výrobe.

- Vďaka premysleným detailom a prepracovaným ergonomickým dizajnom, je X20 viac než len systém ovládania vstupov/výstupov, je to kompletne riešenie kontroly zariadení. V závislosti na požiadavkách užívateľa a individuálnych požiadaviach jednotlivých aplikácií, X20 systém umožňuje spojiť presné komponenty potrebné pre riadenie:
- X20 systém je ideálnym doplnkom štandardnej zbernice a rozširuje možnosti štandardných riadiacich systémov. Jednoducho sa pripája, nakonfigurujete a používa.

Pri spojení s ďalšími modulmi B&R dosahuje svoj plný potenciál a umožňuje implementáciu aplikácií s ohromnými výkonmi a flexibilitou. Veľká výhoda je jeho bezproblémová integrácia.

V jednom module sa nachádzajú tri základné súčasti:

- svorkovnica,
- elektronický modul,
- zbernicový modul.

Systém X20 prináša o 50% viac kanálov než konvenčné systémy, dokonalú technológiu pripojenia a optimálnu zrnitosť. Dôsledné zavedenie 1-vodičového, 2-vodičového alebo 3-vodičového spojenia zabezpečuje, že nie sú potrebné žiadne ďalšie prepojovacie svorky.

2.1.3.1 Modul X20BC0083

Vo fyzikálnom modeli BALBALL je použitý modul X20BC0083. Je to radič zbernice, umožňujúci prepojenie modulu X2X vstupov/výstupov s POWERLINK-om verzie V1 a V2. Modul je Ethernetovým káblom pripojený na Power Panel, odkiaľ dostáva signály na spracovanie, ktoré ďalej posielajú meniču ACOPOS.

X2X zbernicu je možné používať so synchronným cyklovaním 1:1 alebo synchronne s POWERLINK zbernicou pomocou deliča.

X20BC0083 má ďalšie 3 prídavné moduly: X20PS9402, X20AI2622 a X20DM9324 (Obr. 6).



Obr.6 Jednotlivé moduly X20 / spôsob zapojenia

2.1.3.2 Modul X20PS9402

Je to napájací modul používaný spoločne s radičom zbernice X20. Modul je určený na napájanie pre radiče zbernice, X2X zbernicu a interné napájanie vstupov/výstupov. Rozšírenie alebo spolupráca X2X zbernice s modulom X20PS3300 alebo X20PS3310 podporným modulom nie je možná. Rozšírenie systému X20 so zbernicovým vysielačom taktiež nie je povolené.

2.1.3.3 Modul X20AI2622

Modul je vybavený dvoma analógovými vstupmi s 12 bitovým rozlíšením digitálneho prevodníka. Odlišným pripojením koncových bodov si môžeme vybrať medzi výstupným signálom prúdu alebo napätia. AI2622 je určený pre X20 6-pinové svorkovnice. V prípade potreby (napr. z logistických dôvodov) môžu byť tiež použité 12-pinové svorkovnice.

2.1.3.4 Modul X20DM9324

Modul je vybavený ôsmimi digitálnymi vstupmi a štyrmi výstupmi pre 1-linkové pripojenie. Vstupy sú určené pre koncové pripojenie a výstupy pre pripojenie zdroja. Vstupný softvérový filter môže byť konfigurovaný pre celý modul. Obsahuje integrovanú ochranu výstupov.

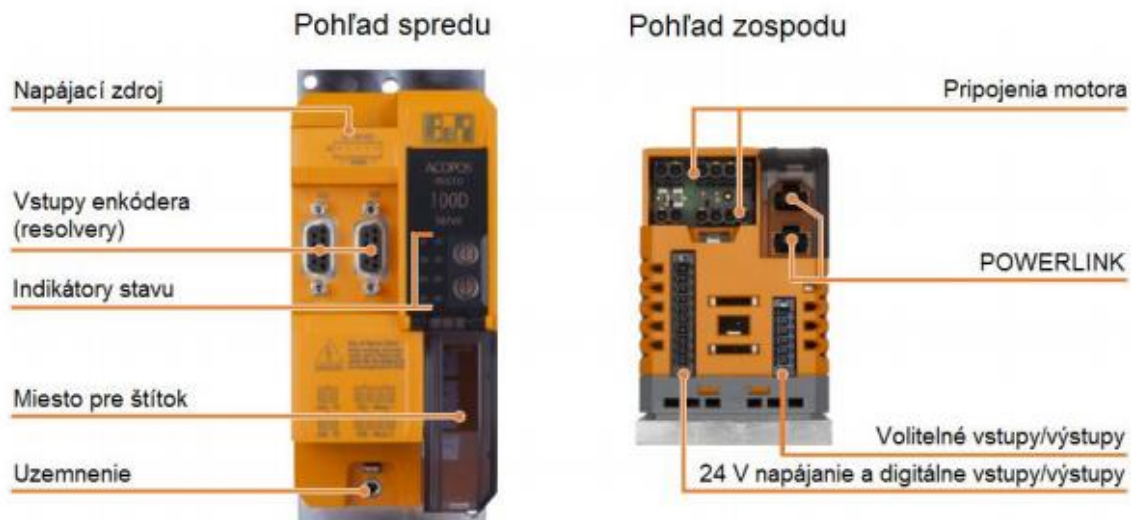
2.1.4 Meniče ACOPOS micro 100D Servo

Modul meniča ACOPOS micro je určený na ovládanie krokových motorov a servomotorov. Aj napriek svojim malým rozmerom dokáže podporovať až dve osi rotácie na jednom module.

Moduly meničov z ACOPOS micro produktovej rady (Obr. 7) sa používajú pre ovládanie jedného až dvoch servomotorov, ktoré sa pripájajú cez resovery (RS 232 porty). Menič je možné pripojiť na 24-64 V \pm 25% menovitého napätia a 8 A jednosmerného prúdu. Boli

navrhnuté pre maximálne menovité napätie 80 V jednosmerného prúdu. Základné charakteristiky ACOPOS micro sú:

- Kompaktný dizajn
- Flexibilné možnosti aplikácie
- Nízke straty tepla
- Jednotný dizajn pre moduly meničov a krokových motorov
- Možnosť rozšírenia



Obr.7 Meničový modul ACOPOS

Meničový modul ACOPOS obsahuje LED diódy, ktoré oznamujú aktuálny stav pripojených súčastí (Obr. 8).

- Dióda R/E svieti na červeno, ak modul nie je napájaný, zelené svetlo svieti, ak je pripravený k prevádzke.
- Dióda ERR indikuje chyba modulu (stály nadprúd, neplatne prijímané dáta,...).
- Diódy L/D1 a L/D2 blikajú, ak je zaznamenaná aktivita na porte 1 alebo 2 (prebieha komunikácia).
- Diódy R/R1 alebo R/R1 svietia, ak je cez daný resolver pripojený a správne nakonfigurovaný servomotor a je pripravený k používaniu.
- Diódy U/D1 a U/D2 svietia na oranžovo pri kladnom smere otáčania motora, na zeleno pri zápornom.

Pre riadenie fyzikálneho modulu BALBALL (Obr.8) diódy R/E, L/D1, R/R1 svietia na zeleno, to znamená, že menič je pripravený a vieme ním riadiť motor. Dióda U/D1 svieti na žltlo, pretože na resolver 2 nie je pripojený žiaden výstup, ale menič automaticky zobrazuje predvolený kladný smer otáčania. Ostatné diódy by mali byť tmavé, ale pôsobia dojemom že svietia, pretože nie sú navzájom izolované a zobrazujú svetlo susedných diód.



Obr.8 Indikačné diódy modulu ACOPOS

2.1.5 Servomotor 8LVA22

Servomotory série 8LV od spoločnosti B&R (Obr.9) boli vyvinuté pre inštaláciu v extrémne malých priestoroch. Sú vybavené buď resolverom alebo vysoko moderným EnDat 2.2 rozhraním, čím sú tieto motory pripravené spĺňať aj tie najnáročnejšie požiadavky. Vďaka ich nízkym momentom zotrvačnosti sú navrhnuté tak, aby boli veľmi dynamické a vyznačujú sa vynikajúcimi vlastnosťami počas zrýchľovania. Tieto motory majú štandardné krytie IP54, ale sú k dispozícii aj s krytím IP65.



Obr.9 Servomotor 8 LVA22

Servomotory sú určené pre použitie s meničmi ACOPOS micro Servo a ponúkajú mimoriadne vysoký výkon, pričom patria medzi jedny z najkompaktnejších servomotorov na trhu. 8LV servomotory sú odporúčané pre širokú škálu aplikácií a poskytujú optimálny pomer cena/výkon v rozsahu výkonu až do 1 kW [14].

Vďaka nízkym momentom zotrvačnosti sú motory rady 8LVA navrhnuté tak, aby boli vysoko dynamické a vyznačujú sa svojimi vynikajúcimi charakteristikami zrýchlenia. Sú to synchronné motory s vlastným chladením. V nasledujúcej tabuľke (Tab.1) sú uvedené základné parametre servomotora.

Tab.1 Katalógové údaje servomotora 8 LVA22

Nominálne otáčky nN	3000 [min-]
Počet párov pólov	4
Nominálny moment Mn	0,65 [Nm]
Nominálny výkon PN	204 [W]
Nominálny prúd IN	2,9 [A]
Záberový moment M0	0,68 [Nm]
Záberový prúd IO	3 [A]
Max. prúd IMAX	10,3 [A]
Odpor statora R2ph	2 [Ω]
Indukčnosť statora L2ph	4,1 [mH]
Moment zotrvačnosti	0,14 [kgcm ²]

2.1.6 Ultrazvukový snímač UNAM 18U6903

Ultrazvukové senzory rady UNAM 18 od firmy Baumer Electric pre meranie vzdialenosti (Obr.10) sú vhodné aj pre meranie výšky hladiny kvapalín, granulátov a pást.



Obr.10 Ultrazvukový snímač vzdialeností UNAM18U6903

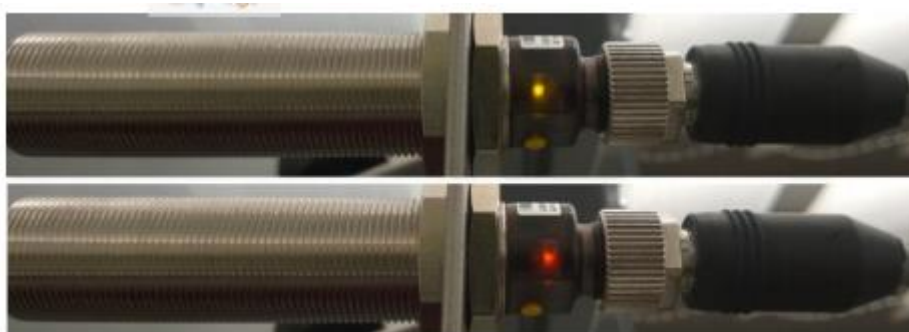
Ultrazvukové senzory z rady UNAM 18 sú vysoko spoľahlivé aj pre merania vzdialeností objektov, ktoré menia farbu alebo majú vysoký odlesk.

Vo fyzikálnom modeli BALBALL nám tento snímač slúži na zaznamenávanie presnej vzdialenosti predmetu. Vyšle ultrazvukový signál, ktorý sa odrazí od najbližšieho objektu, nachádzajúceho sa v rozsahu jeho merania, signál sa odrazí a na základe času snímač zistí vzdialenosť. Táto vzdialenosť je určená bezrozmerným číslom od 0 do 32767, čo sa prevádza do metrickej sústavy. Rozsah snímania je od minima 100 mm po maximum 700 mm, každá nižšia hodnota sa zaznamenáva ako minimum a vyššia ako maximum. V nasledujúcej tabuľke (Tab.2) sú uvedené základné parametre snímača.

Tab. 2 Katalógové parametre ultrazvukového snímača vzdialeností UNAM18U6903

Rozsah snímania	100 ... 700 mm
Rozsah snímania na krátku vzdialenosť	100 ... 700 mm
Rozsah snímania na väčšiu vzdialenosť	100 ... 700 mm
Presnosť opakovania	< 0,5 mm
Rozlíšenie	< 0,3 mm
Nastavenie	dotykové
Frekvencia ultrazvuku	240 kHz
Doba odozvy	< 80 ms
Doba poklesu	< 80 ms
Zarovňavacia podpora	Blikanie cieľovej indikácie
Svetelný indikátor	Žltá LED/ červená LED
Teplotný skok	< 2% zo vzdialenosti objektu
Rozsah napájania +Vs	15 ... 30 VDC
Max. prúdová spotreba (bez zaťaženia)	35 mA
Výstupný obvod	Napätový výstup
Výstupný signál	0 ... 10V/ 10 ... 0 V

Snímač obsahuje 2 LED diódy, pre ktoré si vieme nastaviť žltým tlačidlom na spodnej strane snímača východiskovú hodnotu, na ktorú diódy reagujú tak, že ak snímač zaznamená vyššiu hodnotu od nami stanovenej, svieti žltá dióda, ak nižšiu, zasvieti červená (Obr. 11).



Obr.11 Indikácia vzdialenosti pomocou diód

3 Matematický model

Táto kapitola sa zaoberá tvorbou matematického modelu pre fyzikálny model BALBALL v prostredí Matlab/Simulink.

Na odvodenie matematického modelu využijeme spätno-väzobnú linearizáciu. Najprv si odvodíme matematický popis pomocou rovníc, z ktorých následne vytvoríme model v prostredí Matlab/Simulink.

3.1 Analytický popis sústavy

Na vytvorenie matematického modelu systému BALBALL využijeme Euler-Lagrangeovú rovnicu.

Za predpokladu, že trecí koeficient je dostatočne veľký na to, aby valivé trenie lopty bolo bez sklzu, potom je lopta v neustálom kontakte s kolesom. Uvažujme Euler-Lagrangeovu rovnicu v tvare:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right] - \frac{\partial L}{\partial q} = Q \quad (1)$$

kde L je Lagrangeova funkcia, výsledný parameter Q sú všeobecné sily a q sú zovšeobecnené súradnice.

Definícia Lagrangovej funkcie L je:

$$L = T - V \quad (2)$$

kde T je kinetická a V potenciálna energia. Pre systém BALBALL je q zvolené ako:

$$q = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

kde θ_1 je uhlová výchylka medzi stredom lopty a kolesom a osou y a θ_2 je uhlová výchylka kolesa.

Q je zvolené ako:

$$Q = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau \end{bmatrix} \quad (4)$$

kde τ je moment, ktorý pôsobí na koleso. Výpočet kinetickej energie je:

$$T_b = \frac{1}{2} m_b (r_w + r_b)^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} I_b \dot{\theta}_2^2 \quad (5)$$

kde m_b - hmotnosť lopty, r_w - polomer kolesa, r_b - polomer lopty, θ_2 - uhlový posun stredu lopty vo vertikálnom smere.

Moment zotrvačnosti pre loptu je daný:

$$I_b = \frac{2}{5} m_b r_b^2 \quad (6)$$

pričom kinetická energia kolesa je:

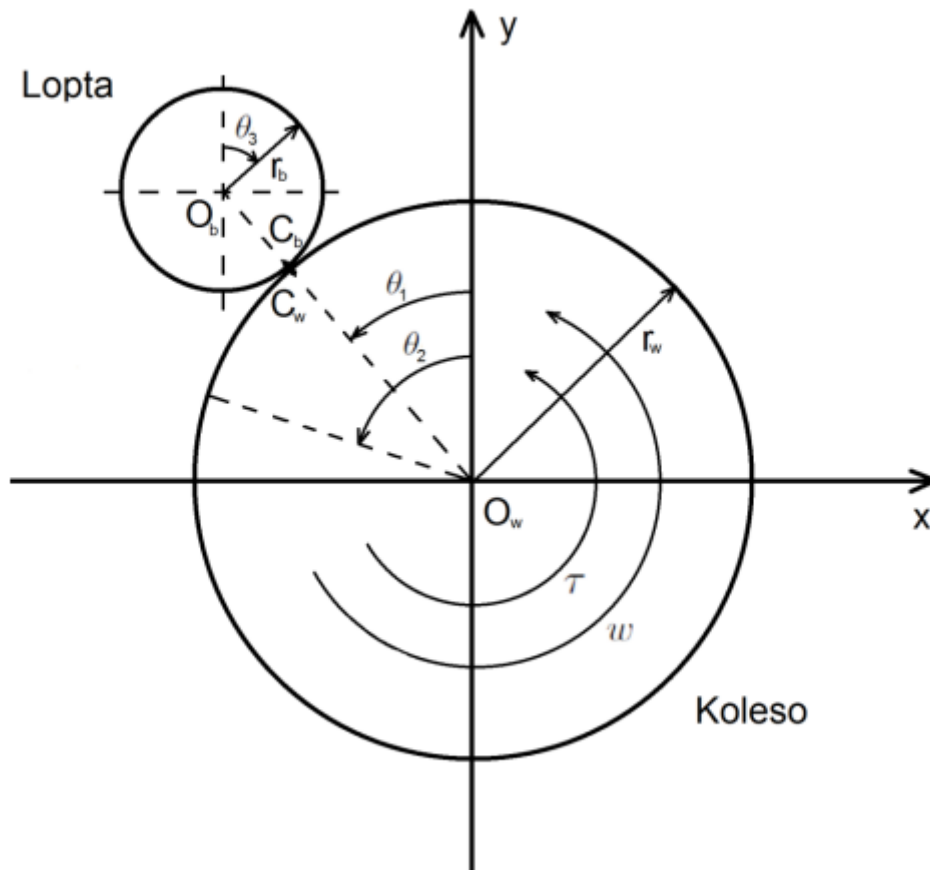
$$T_w = \frac{1}{2} I_w \dot{\theta}_2^2 \quad (7)$$

kde I_w je moment zotrvačnosti kolesa.

Výsledná celková kinetická energia T sa potom vypočíta :

$$\begin{aligned} T &= T_w + T_b \\ &= \frac{1}{2} I_w \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} m_b (r_w + r_b)^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{2}{5} m_b r_b^2 \right) \dot{\theta}_3^2 \end{aligned} \quad (8)$$

Veličiny použité vo vzorcoch sú názorne zobrazené na Obr.12.



Obr.12 Znáozornenie veličín fyzikálneho modelu BALBALL

Na Obr.12 θ_1 označuje uhlové posunutie medzi a líniou prechádzajúcou stredom lopty a kolesa, a osou y , θ_2 označuje uhlové posunutie kolesa a θ_3 označuje zmeny polohy lopty. O_w a O_b sú centrá kolesa a lopty, C_b a C_w sú kontaktné body lopty a kolesa. τ je moment

pôsobiaci na koleso proti smeru hodinových ručičiek, ω je uhlová rýchlosť kolesa. Všetky uhly sa berú kladné. Obmedzenie nastane, keď koleso a lopta rotujú a vzájomne sa prevrátia.

Nech $\frac{v_{C_w}}{o_w}$ určuje rýchlosť kontaktného miesta C_w vzhľadom na stred kolesa O_w tak, ako je to na Obr.12, z toho nám vyplýva:

$$\frac{v_{C_w}}{o_w} = \dot{\theta}_2 r_w e, \quad (9)$$

Kde e je jednotkový vektor, ktorý je dotyčnica ku kontaktnému bodu a zobrazuje smer rastúceho θ_2 . Tiež nech $\frac{v_{C_b}}{o_b}$ určuje rýchlosť kontaktného bodu C_b , vzhľadom na stred lopty O_b , ktorý je možné vidieť na Obr.12, a z toho vyplýva:

$$\frac{v_{C_b}}{o_b} = \dot{\theta}_3 r_b e. \quad (10)$$

Za predpokladu bezsklzového valcovania je kontaktné miesto C_b okamžite v pokoji vzhľadom ku kontaktnému bodu C_w , čo môžeme pozorovať na Obr. 12 - vzťahná sústava je spojená motorom. Rýchlosť príbuzného bodu C_b k bodu C_w je daná:

$$v_{C_b/C_w} = 0 \quad (11)$$

Podľa Obr. 12, je rýchlosť stredu lopty k stredu kolesa:

$$v_{O_b/O_w} = \dot{\theta}_1 (r_w + r_b) e \quad (12)$$

Z rovníc (2) – (4) dostaneme:

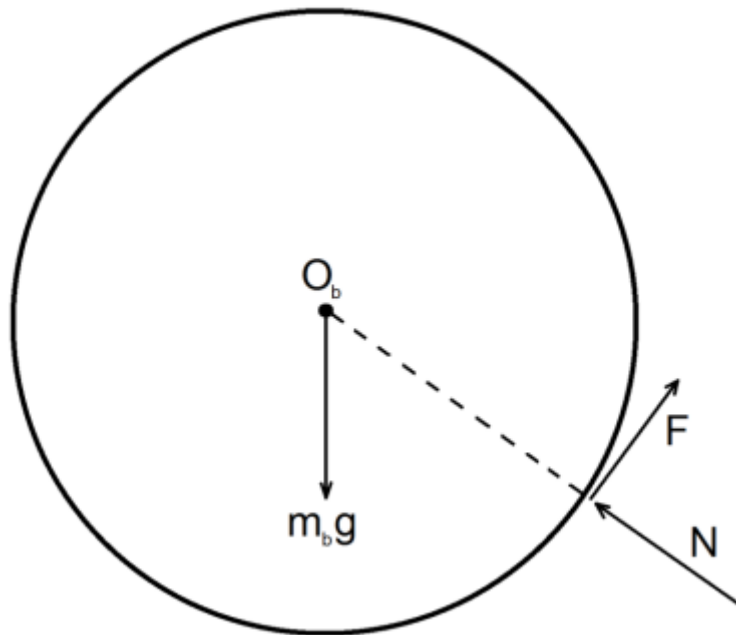
$$\begin{aligned} \frac{v_{O_b}}{o_w} &= \frac{v_{O_b}}{c_b} + \frac{v_{C_b}}{c_w} + \frac{v_{C_b}}{o_w} \\ &= -\dot{\theta}_1 r_b e + \dot{\theta}_2 r_w e \end{aligned} \quad (13)$$

Pričom z rovníc (12), (13) dostávame podmienku otáčania:

$$r_w \dot{\theta}_2 - (r_w + r_b) \dot{\theta}_1 = r_b \dot{\theta}_3 \quad (14)$$

Môžeme si všimnúť, že $\dot{\theta}_3$ sa nedá merať priamo. Avšak pri spätných väzbách je možné získať z merania $d\theta_2$ a $d\theta_1$.

Vektor \mathbf{N} označuje normálne reakčné sily vzhľadom ku kolesu, zatiaľ čo vektor \mathbf{F} označuje trecie sily (Obr. 13). Vonkajšia sila $m_b g \cos \theta_1 - N$ zabezpečuje dostredivé zrýchlenie, potrebné k tomu, aby bola lopta udržiavaná na kraji kolesa.



Obr.13 Sily pôsobiace na koleso

Ak využijeme rovnicu (14), dostaneme:

$$T = \frac{1}{2} I_w \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} m_b (r_w + r_b)^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{5} m_b (r_w \dot{\theta}_2 - r_w \theta_1 - r_b \dot{\theta}_1)^2 \quad (15)$$

Potom celková potenciálna energia V je:

$$V = m_b g (r_w + r_b) \cos \theta_1 \quad (16)$$

kde g je gravitačné zrýchlenie.

Lagrangeová funkcia je daná:

$$\begin{aligned} L &= T - V \\ &= \frac{1}{2} I_w \dot{\theta}_2^2 + \frac{1}{2} m_b (r_w + r_b)^2 \dot{\theta}_1^2 \\ &\quad + \frac{1}{5} m_b (r_w \dot{\theta}_2 - r_w \theta_1 - r_b \dot{\theta}_1)^2 - m_b g (r_w + r_b) \cos \theta_1 \end{aligned} \quad (17)$$

Potom dostaneme:

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_1} = m_b g (r_w + r_b) \cos \theta_1 \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} &= \left(\frac{7}{5} r_w^2 m_b + \frac{14}{5} r_w r_b m_b + \frac{7}{5} r_b^2 m_b \right) \dot{\theta}_1 \\ &+ \left(-\frac{2}{5} r_w^2 m_b - \frac{2}{5} r_w r_b m_b \right) \dot{\theta}_2, \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} \right) &= \left(\frac{7}{5} r_w^2 m_b + \frac{14}{5} r_w r_b m_b + \frac{7}{5} r_b^2 m_b \right) \ddot{\theta}_1 \\ &+ \left(-\frac{2}{5} r_w^2 m_b - \frac{2}{5} r_w r_b m_b \right) \ddot{\theta}_2, \end{aligned} \quad (20)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_2(t)} = 0, \quad (21)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} = \left(-\frac{2}{5} r_w^2 m_b - \frac{2}{5} r_w r_b m_b \right) \dot{\theta}_1 + \left(I_w + \frac{2}{5} r_w^2 m_b \right) \dot{\theta}_2, \quad (22)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} \right) = \left(-\frac{2}{5} r_w^2 m_b - \frac{2}{5} r_w r_b m_b \right) \ddot{\theta}_1 + \left(I_w + \frac{2}{5} r_w^2 m_b \right) \ddot{\theta}_2. \quad (23)$$

Z rovnice (1) a (18) – (23) máme pohybové rovnice:

$$(7r_b + 7r_w)\ddot{\theta}_1 - 2r_w\ddot{\theta}_2 - 5g \sin \theta_1 = 0 \quad (24)$$

$$\left(-\frac{2}{5} r_w^2 m_b - \frac{2}{5} r_w r_b m_b \right) \ddot{\theta}_1 + \left(I_w + \frac{2}{5} r_w^2 m_b \right) \ddot{\theta}_2 = \tau \quad (25)$$

Rovnice (24) a (25) môžu platiť iba za predpokladu, že je dostredivá sila dostatočne veľká, aby sa zachoval kruhový pohyb lopty na kolese. Ak to neplatí, lopta môže opustiť koleso. Vieme použiť 3. Newtonov zákon, sila a smer pôsobenia sú dané :

$$m_b g \cos \theta_1 - N = m_b (r_w + r_b) \dot{\theta}_1^2 \quad (26)$$

kde N je reakčná sila. Ak by celková sila bola

$$m_b g \cos \theta_1 - N \quad (27)$$

je nutné udržať kruhový pohyb lopty na kolese a nasledujúca podmienka musí byť zachovaná:

$$N = m_b g \cos \theta_1 - m_b (r_w + r_b) \dot{\theta}_1^2 > 0 \quad (28)$$

4 Počítačový model systému BALBALLv programe Simulink

Po zostavení matematického modelu fyzikálneho systému BALBALL si môžeme vytvoriť jeho počítačový model.

Systém BALBALL budeme modelovať pomocou diferenciálnych rovníc, ktoré boli odvodené v predchádzajúcej kapitole (Kap.3.1.)

Konkrétne model v programe Simulink budeme vytvárať z výsledných rovníc (24, 25, 28).

V rovniciach (24 a 25) boli urobené nasledujúce substitúcie:

$$\begin{aligned}k_1\ddot{\theta}_1 - k_3 \sin \theta_1 &= k_2\ddot{\theta}_2 \\k_5\ddot{\theta}_2 - M &= k_4\ddot{\theta}_1\end{aligned}\tag{29}$$

kde platí:

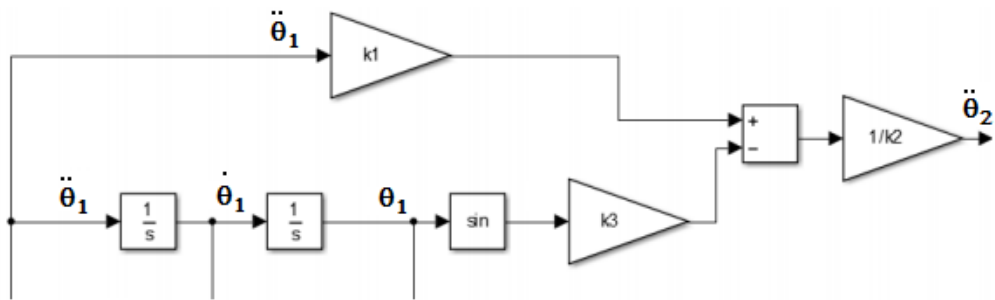
$$\begin{aligned}k_1 &= 7r_b + 7r_w \\k_2 &= 2r_w \\k_3 &= 5g \sin \theta_1 \\k_4 &= \frac{2}{5}r_w^2 m_b - \frac{2}{5}r_w r_b m_b \\k_5 &= I_w + \frac{2}{5}r_w^2 m_b \\ \tau &= M\end{aligned}\tag{30}$$

4.1 Tvorba počítačového modelu

V tejto kapitole je detailne popísaný postup vytvárania počítačového modelu. Na Obr.14 vidíme blokovú schému rovnice

$$k_1\ddot{\theta}_1 - k_3 \sin \theta_1 = k_2\ddot{\theta}_2.\tag{31}$$

ktorej vstupom je $d^2\theta_1$ a θ_1 a výstupom je $d^2\theta_2$.

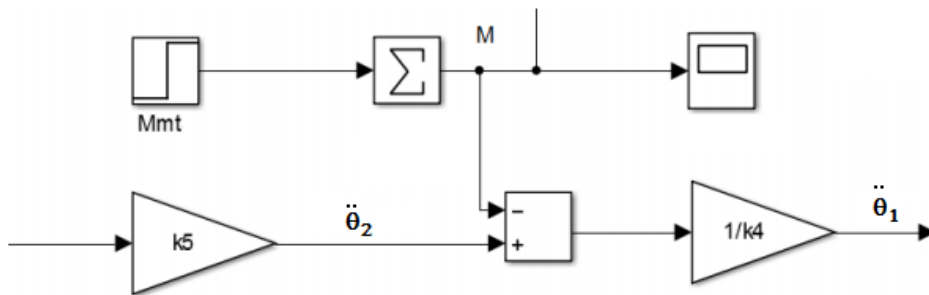


Obr.14 Bloková schéma rovnice 31

Na Obr.15 je blokovú schému rovnice:

$$k_5 \ddot{\theta}_2 - M = k_4 \ddot{\theta}_1, \quad (32)$$

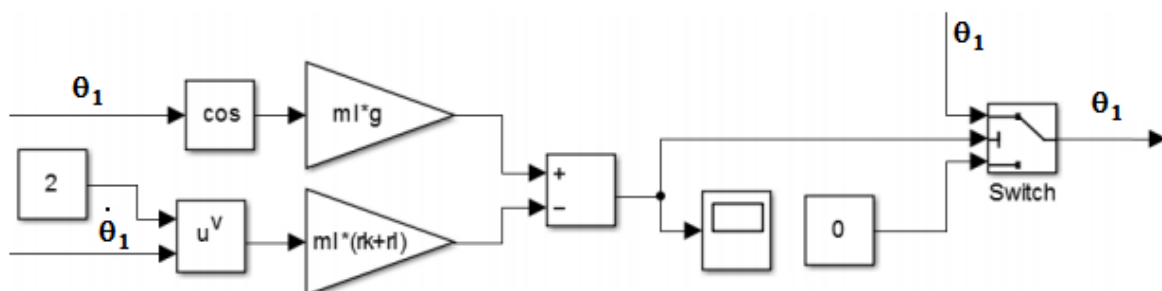
ktorej vstupom je moment M a $d^2\theta_2$ a výstupom je $d^2\theta_1$.



Obr.15 Bloková schéma rovnice 32

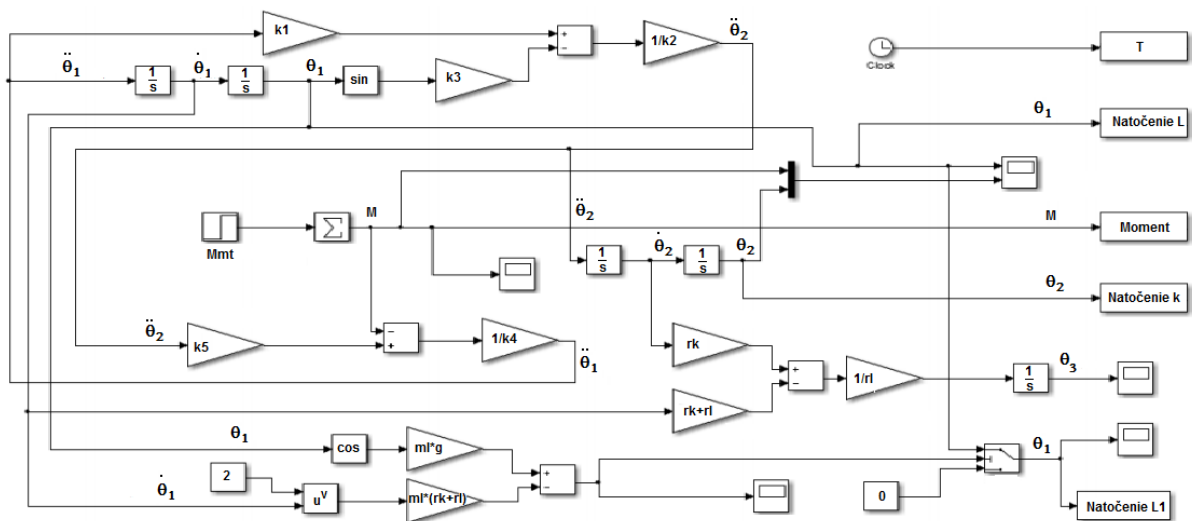
Na Obr.16 je zobrazená bloková schéma podmienky pre zachovanie fyzikálnych zákonov:

$$N = m_b g \cos \theta_1 - m_b (r_w + r_b) \dot{\theta}_1^2 > 0 \text{ a } m_b g \cos \theta_1 - N = m_b (r_w + r_b) \dot{\theta}_1^2 \quad (33)$$



Obr.16 Bloková schéma rovnice 33

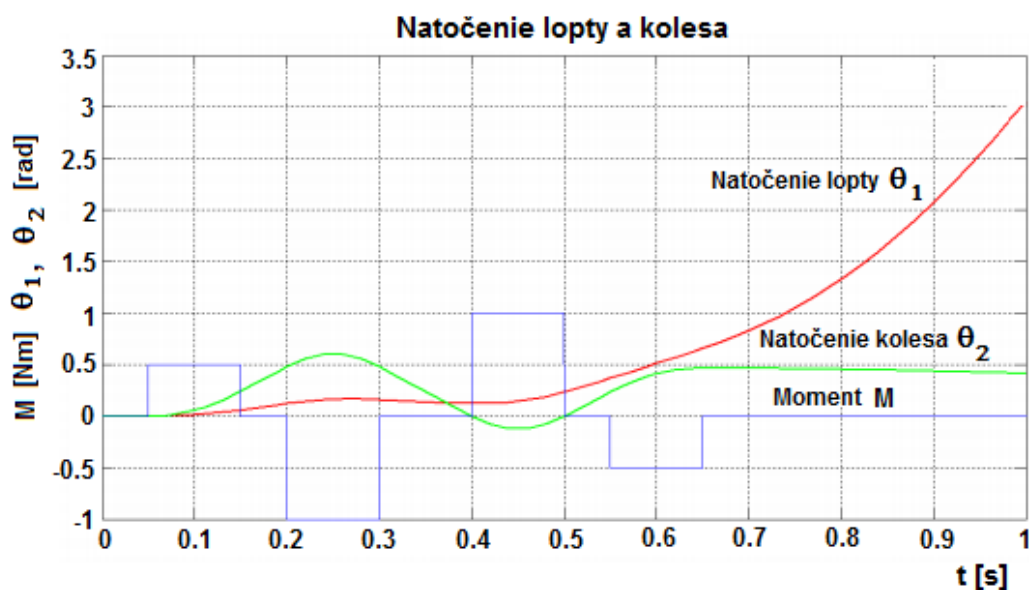
Výsledná bloková schéma počítačového modelu fyzikálneho systému BALBALL je na Obr.17.



Obr.17 Výsledná bloková schéma systému BALBALL v programe Simulink

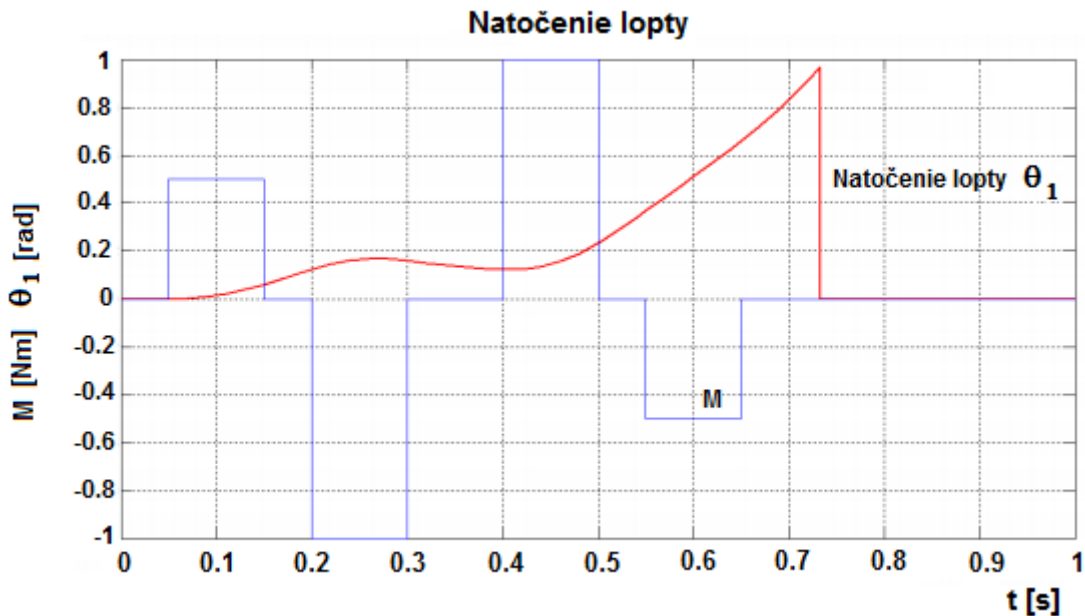
4.2 Verifikácia počítačového modelu

Pre overenie dynamických vlastností systému privedieme na jeho vstup moment - M. V čase 0.05 s bol na jeho vstup privedený moment $M = 0.5 \text{ Nm}$, koleso a loptička sa rozbehli. Na vstup systému boli potom v rôznych časoch až do času $t = 0.65$ privádzané rôzne hodnoty momentov z intervalu $\langle -1, 1 \rangle$. Koleso aj loptička sa pohybovali zo strany na stranu, menili smer a po pridaní poslednej hodnoty momentu sa točili do nekonečna, pretože neboli obmedzované podmienkou, ale odlišným natočením, tak ako je to ukázané na Obr.18.



Obr.18 Natočenie lopty a kolesa pre rôzne hodnoty momentov na vstupe bez obmedzenia

Dynamika systému pri pôsobení rovnakých momentov na vstupe systému, pričom uvažujeme obmedzenie polohy lopty je ukázaná na Obr.19.



Obr.19 Natočenie lopty a kolesa pre rôzne hodnoty momentov na vstupe s obmedzením

5 Softvérová podpora fyzikálneho modelu Ballball

Na ovládanie a regulovanie fyzikálneho modelu Ballball sa používa program Automation Studio, ktorý je určený na vývoj programov pre programovateľné automaty od firmy B&R. Pre tvorbu simulačného modelu sa používa program Matlab/Simulink. Tento model sa potom priamo bez nutnosti jeho programovania v programovateľnom automate prekonvertuje do PLC. Na generovanie kódu z Matlab/Simulink do PLC sa používa toolbox s názvom Automation Studio target for Simulink. Ten sa nainštaluje priamo do Simulinku.

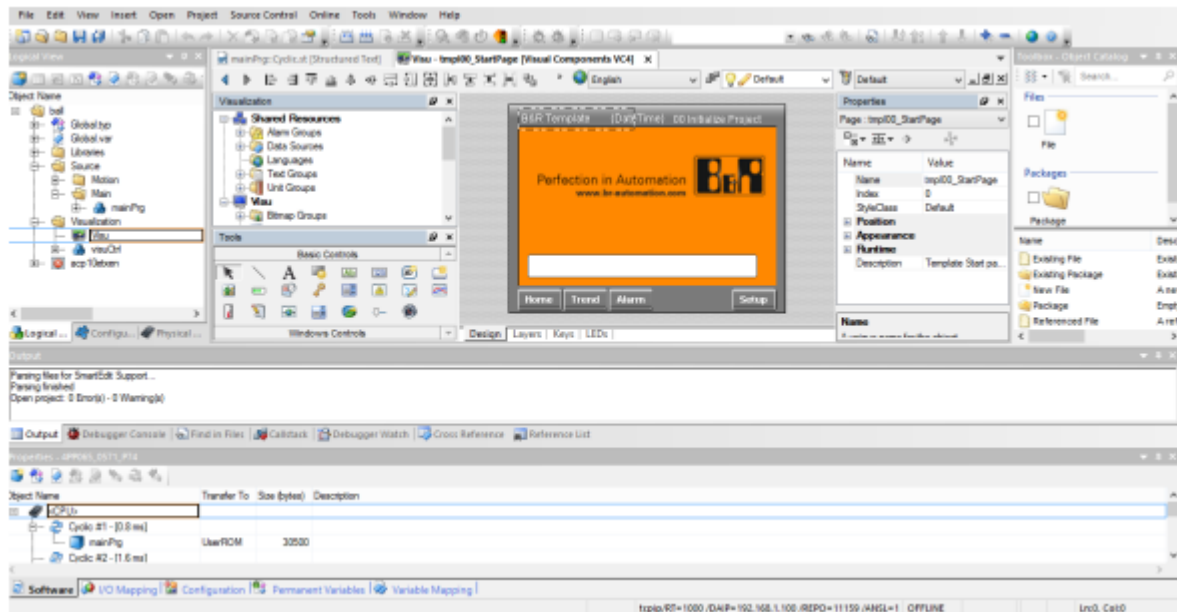
5.1 Automation Studio

B& R Automation Studio (Obr.20) je integrované softvérové vývojové prostredie, ktoré obsahuje nástroje pre všetky fázy projektu. Regulátory, pohony, komunikácia a vizualizácia môžu byť nakonfigurované v jednom prostredí. To znižuje vývojový čas a aj náklady na údržbu.

Automation Studio ponúka tieto jazyky:

- B&R Automatio Basic,
- ANSI C,
- Continous Function Chart,
- Function Block Diagram,
- Instruction List,

- Ladder Diagram,
- Sequential function chart,
- Structured Text.



Obr.20 Vývojové prostredie Automation Studio

Z nich sa v praxi najčastejšie používajú hlavne Structured text (štruktúrovaný text), Ladder Diagram (rebríkový diagram) a ANSI C.

Žiaden z jazykov nepotrebuje dopredu deklarovat' premenné. Ak sa vyskytne v programe nová premenná, otvorí sa okno deklarácie premennej, kde si vieme definovať jej typ, počiatočnú hodnotu a podľa potreby aj iné parametre, ako spôsob uloženia – uloží sa informácia či bude premenná po reštarte uložená v pamäti alebo bude jej hodnota zmazaná a po nabehnutí systému sa jej priradí inicializačná hodnota.

Všetky jazyky môžu pristupovať k rovnakým typom dát a používajú rovnaké knižnice a premenné. Okrem toho, Automation Studio podporuje jednoduché a bezpečné programovanie.

Vizualizačný systém integrovaný v Automation Studio je efektívny nástroj, ktorý môžeme použiť na vytvorenie riadkového displeja alebo ovládanie integrovaného alebo vzdialeného XGA displeja s tlačidlami alebo dotykovou obrazovkou.

Regulácia sa v Automation Studio realizuje prostredníctvom PID regulátora.

5.2 PID regulátor

Proporcionálno-integračne-derivačný regulátor je spätно-väzobný regulátor, široko používaný v priemyselných riadiacich systémoch. PID regulátor (Obr. 21) vypočíta hodnotu regulačnej odchýlky ako rozdiel medzi meranou procesnou premennou a požadovanou hodnotou. Regulátor minimalizuje odchýlku úpravou procesu použitím akčných veličín.

Algoritmus PID regulátora zahŕňa tri samostatné konštantné parametre: proporcionálne, integračné a derivačné hodnoty označené P, I, a D.

Proporcionálna zložka P je obyčajný zosilňovač s nastaviteľným zosilnením, závisí na aktuálnej odchýlke. Regulačná odchýlka je priamo úmerná akčnej veličine:

$$u(t) = K_p \cdot e(t)$$

Integračná zložka je integrátor s nastaviteľným koeficientom, závisí na akumulácii predošlých odchýlok. Akčná veličina je priamo úmerná integrálu regulačnej odchýlky:

$$u(t) = K_i \int_0^1 e(t) dt$$

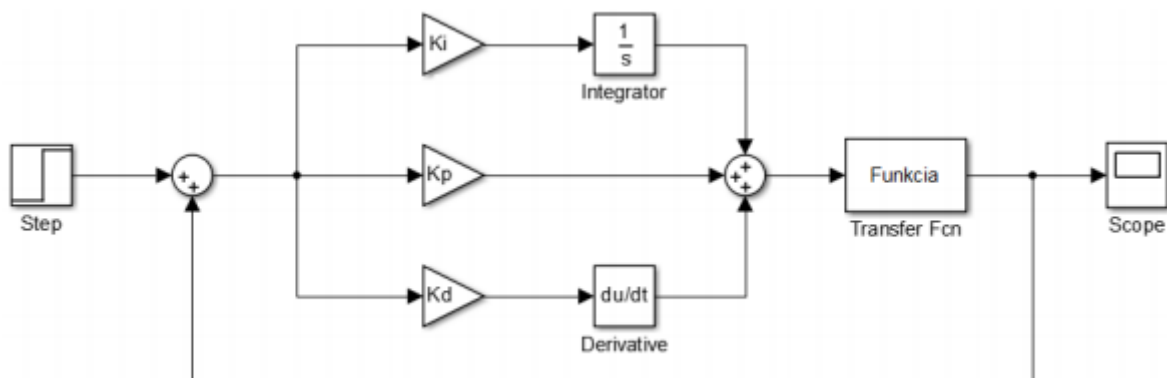
Derivačná zložka je derivátor s nastaviteľným koeficientom, je to predikcia budúcich odchýlok. Akčná veličina je priamo úmerná derivácii regulačnej odchýlky:

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Potom celkový prenos má tvar:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int_0^1 e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Celkový súčet týchto troch krokov sa používa pre nastavenie procesu, pomocou ovládacieho elementu, ako je pozícia regulačného ventilu, klapky, alebo dodávanie energie do vykurovacieho telesa.

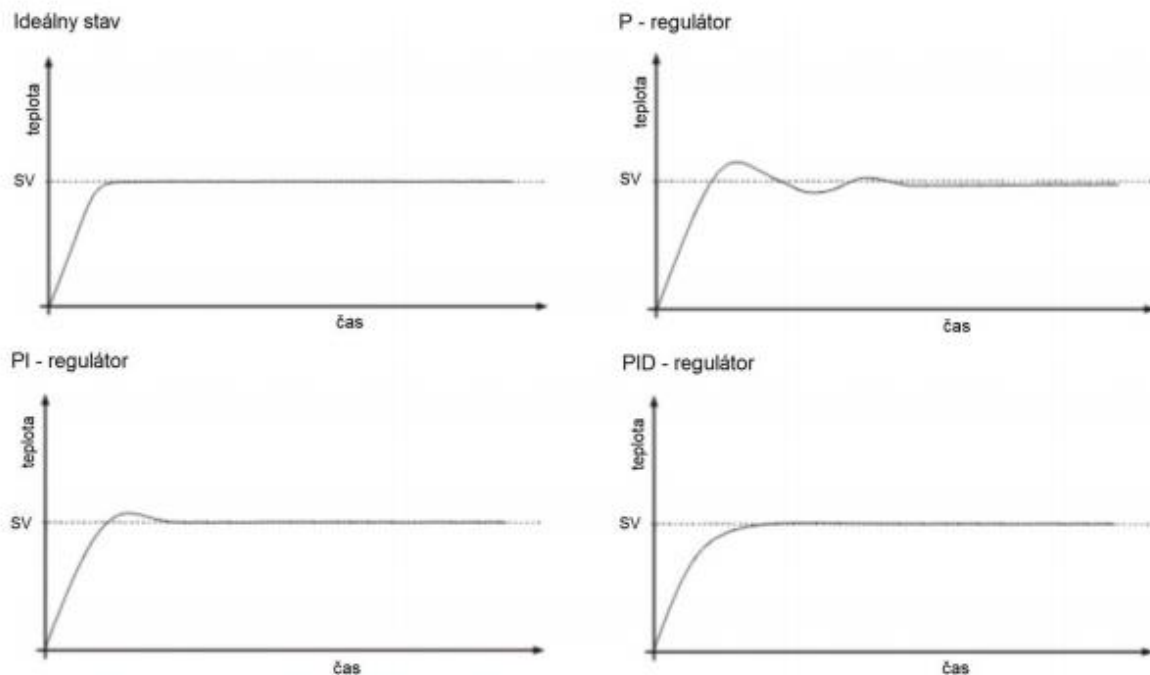


Obr.21 Bloková schéma PID regulátora

PID regulátor je považovaný za najužitočnejší regulátor. Nastavením troch parametrov PID regulátora môžeme dosiahnuť požadované hodnoty regulovaného systému.

Nastavením niektorých jeho zložiek na nulu dostávame ďalšie odvodené typy regulátorov: PI, PD, P alebo I regulátor. Porovnanie vlastností jednotlivých typov regulátor pre rovnaké žiadané hodnoty na výstupe systému je na Obr. 22.

V praxi sa veľmi často používajú regulátory typu PI, pretože pomocou nich dosiahneme na v regulovanom systéme nulovú regulačnú odchýlku, čo nie je možné dosiahnuť použitím regulátora typu P.



Obr.22 Porovnanie dynamických vlastností jednotlivých typov regulátorov.

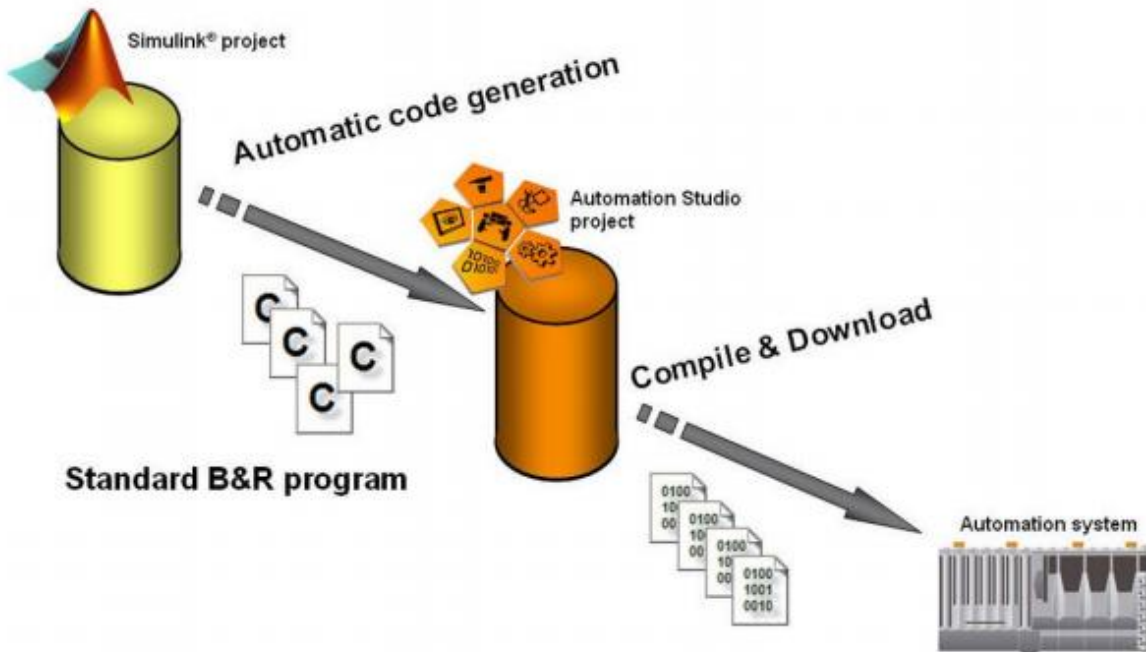
Aby sme mohli PID regulátor z programu Matlab/Simulink preniesť do vývojového prostredia programu Automation Studio, budeme potrebovať doplnkový nástroj (toolbox) pre Matlab s názvom *Automation Studio Target To Simulink*.

5.3 Automation Studio Target To Simulink

Automation Studio Target for Simulink od firmy B&R je jednoduché, ale výkonné riešenie pre implementáciu pokročilých regulátorov uzavretou slučkou pomocou B&R hardvéru. Poskytuje ďalšie rozširujúce sady blokov pre Simulink, umožňujúce zmenu parametrov a premenných na požadovanú formu. B&R Automation Studio Target pre Simulink podporuje celú radu B&R techniky pre integrované automatizácie.

Automatická implementácia modelov vytvorených v prostredí Simulink do C kódu, špeciálne optimalizovaného pre použitie v B&R cieľových systémoch, ponúka nové možnosti pre vývojárov navrhovať sofistikované simulačné modely a kontrolné štruktúry, čo by inak nebolo možné alebo by to bolo časovo veľmi náročné na realizáciu.

Základný princíp je jednoduchý: modul vytvorený v programe Simulink je automaticky prepočítavaný cez Real-Time Workshop a Real-TimeWorkshop Embedded Coder (ktorý je voliteľný) do optimálneho jazyka pre B&R cieľový systém a zaručuje maximálny výkon generovaného zdrojového kódu. Bezproblémová integrácia do projektu Automation Studio robí celý vývojový proces jednoduchým (Obr. 23).



Obr.23 Automation Studio Target for Simulink

Typickými užívateľmi sú:

- Vývojári v oblasti priemyselnej automatizácie, ktorí chcú rozvíjať svoje algoritmy v Simulinku a priviesť ich do priemyselných cieľov (do PLC alebo priemyselného počítača) vytvorených v reálnom čase, tak rýchlo, ako je to možné.
- Inovatívny výrobcovia strojov, ktorí chcú využitím projektovania formou vytvárania modelov znížiť čas a náklady na vývoj.
- Výrobcovia strojov, ktorí chcú napodobniť správanie svojho stroja alebo linky na cieľi vytvorenom v reálnom čase.

Oblasti využitia:

- Rýchle vyvíjanie prototypov.
- Vytváranie riadiacej jednotky podľa modelu.
- Vývoj komplexných riadiacich štruktúr.
- Hardvér v slučke - emulácia kritických komponentov systému.
- Návrh filtrov hodnôt merania.
- Statická analýza dát.

Výhody pre zákazníka:

- Redukovanie času vývoja.
- Zvýšenie produktivity.
- Dokumentované a znova použiteľné znalosti o procesoch.
- Optimalizované parametre regulátora.
- Rozsiahle knižnice funkcií.
- Početné možnosti vyhodnocovania.
- Intuitívne ovládanie.

Technické dáta:

- Generovanie kódu pre PLC po stlačení tlačidla.
- Komplexná integrácia v Automation Studio.
- Voliteľná podpora pre Real-Time Workshop Embedded Coder.
- Online ladenie pre Simulink (externý režim).
- Požadovaný MATLAB verzie 2007b alebo vyšší.

6 Postup pri realizácii regulácie fyzikálneho modelu BALLBAL

V tejto kapitole bude popísaný postup realizácie regulácie požadovanej polohy loptičky fyzikálneho modelu BALLBAL. Postupne tu budú popísané jednotlivé kroky od konfigurácie siete cez nastavenie siete až po realizáciu samotného regulátora.

6.1 Uvedenie kola do pohybu

Prvým a najpodstatnejším krokom je uviesť pohon, ktorý poháňa koleso, do pohybu.

Úlohou je správne priradiť a nastaviť jednotlivé moduly v programe **Automation Studio** 4.2, odkiaľ bude možné pri správne nastavenej konfigurácii riadiť celú sústavu.

6.1.1 Nastavenie siete

Pre pripojenie PLC k počítaču je potrebné nastaviť IP adresy tak, aby obidve zariadenia používali jednu podsieť. Preto podľa IP adresy počítača je potrebné nastaviť IP adresu pre PLC položke **Online** → **Settings**.

Po nastavení IP adresy je potrebné vybrať Ethernetové pripojenie s názvom **ARwin** (pozri Obr. 24). Po kliknutí pravým tlačidlom myši sa otvorí kontextové menu, kde vyberieme položku **Connect** (pripojiť). Táto voľba uvedie PLC z módu OFFLINE do módu RUN (chod), čo nám umožní spustiť program, ktorý je v ňom uložený.

Connection name	Use in active config	Source INA node number	Destination IP address	Destination host name	Destination INA node number
ARsim_TCPIP	<input type="checkbox"/>	1	127.0.0.1		
ARwin	<input type="checkbox"/>	1	192.168.1.100		
TCPIP	<input type="checkbox"/>	1			2

Obr.24 Nastavenie siete v Automation Studio

6.1.2 Konfigurácia modulov v PLC

Po nastavení sieťovej komunikácie je potrebné nakonfigurovať jednotlivé hardvérové komponenty. Túto úlohu je možné realizovať dvoma spôsobmi:

Vytvoriť v PLC projekt a následne vyhľadať moduly v zozname a pridať ich alebo

Pri vytváraní projektu zaškrtnúť voľbu “**Identify control systém online**“, čo zabezpečí automatickú detekciu HW komponentov PLC a ich pridanie do projektu. Automaticky sa takto detekuje Power Panel a komunikačné moduly. Modul Servomotora sa nedetekuje, preto je ho potrebné priradiť manuálne. Postupujeme nasledovne:

1. V ľavej časti menu vyberieme položku **Physical View**,
2. Vyberieme položku **POWERLINK**, kde následne vyberieme voľbu „**vložiť nový hardvér**“, a nastavíme konkrétny motor 8LVA22.R0030D0000-0 Rev.C0, vytvoriť os rotácie a celý výber potvrdíme.

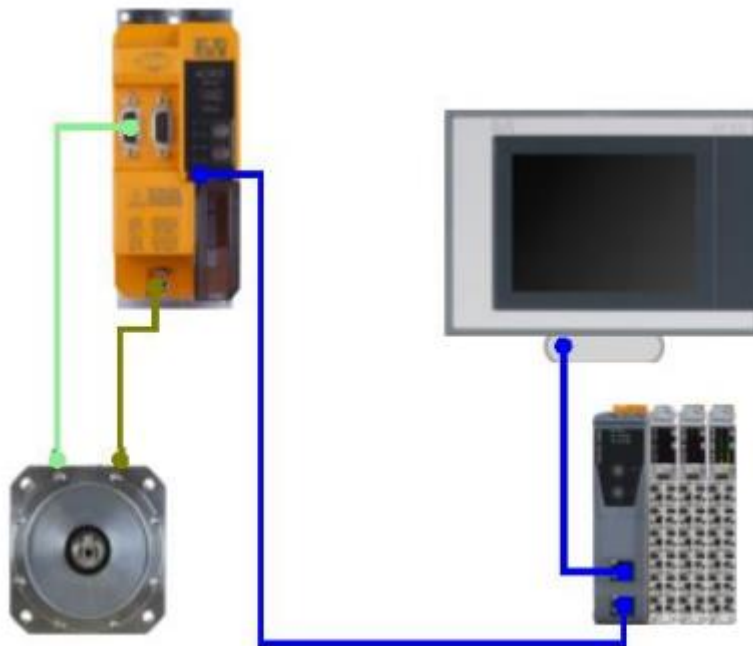
Pridané moduly a ich hierarchiu si vieme pozrieť v položke Physical View (Obr. 25) vývojového prostredia Automation Studio.

Model no.	Slot	Version	Description
4PP065.0571-P74	PLC1.CPU	1.0.1.0	PP065 TFT C QVGA 5.7 T, EPL, ETH, USB
USB 1	IF6		
USB 2	IF7		
Display	DS1		PP065 TFT C QVGA 5.7in T, EPL, ETH, USB
	SK1		
	SS1		
X20BC0083	PLC1.CPU.IF4.ST1	1.2.1.0	X20 Bus Controller POWERLINK
X20PS9402	PLC1.CPU.IF4.ST1.IF1.ST1	1.0.1.0	24 VDC power supply module for BC, internal IO supply and bus, no isolation
X20AI2622	PLC1.CPU.IF4.ST1.IF1.ST2	1.0.2.0	2 Inputs ±10 V / 0 to 20 mA
X20DM9324	PLC1.CPU.IF4.ST1.IF1.ST3	1.0.1.0	8 Digital Inputs 24 VDC, Sink; 4 Outputs 24 VDC / 0.5 A, Source
80VD100PD.C022-01	PLC1.CPU.IF4.ST4	1.1.1.2	ACOPOSmicro Servo, 2x 8 A, 2x Resolver
80VDxxxxxx.xx22-xx	SS1	1.1.1.2	ACOPOSmicro resolver interface
80VDxxxxxx.xx22-xx	SS2	1.1.1.2	ACOPOSmicro resolver interface
8LVA22.R0030D0000-0 Rev.C0	M1	1.0.0.1	Servo Motor
8LVA22.R0030D0000-0 Rev.C0	M2	1.0.0.1	Servo Motor

Obr.25 Okno Physical View

Program Automatio Studio nám vie vygenerovať funkčné zobrazenie prepojenia jednotlivých modulov. Modrá vetva zobrazuje prenos dát klasickými ethernetovými káblami. Zelená vetva

symbolizuje pripojene na resolver (cez kábel RS 232,) ktoré zabezpečuje napájanie pohonu. Žltá farba označuje zapojenie uzemnenia (Obr. 26).



Obr.26 Prepojenie HW pracoviska s fyzikálnym modelom BALLBAL

6.1.3 Test servomotora

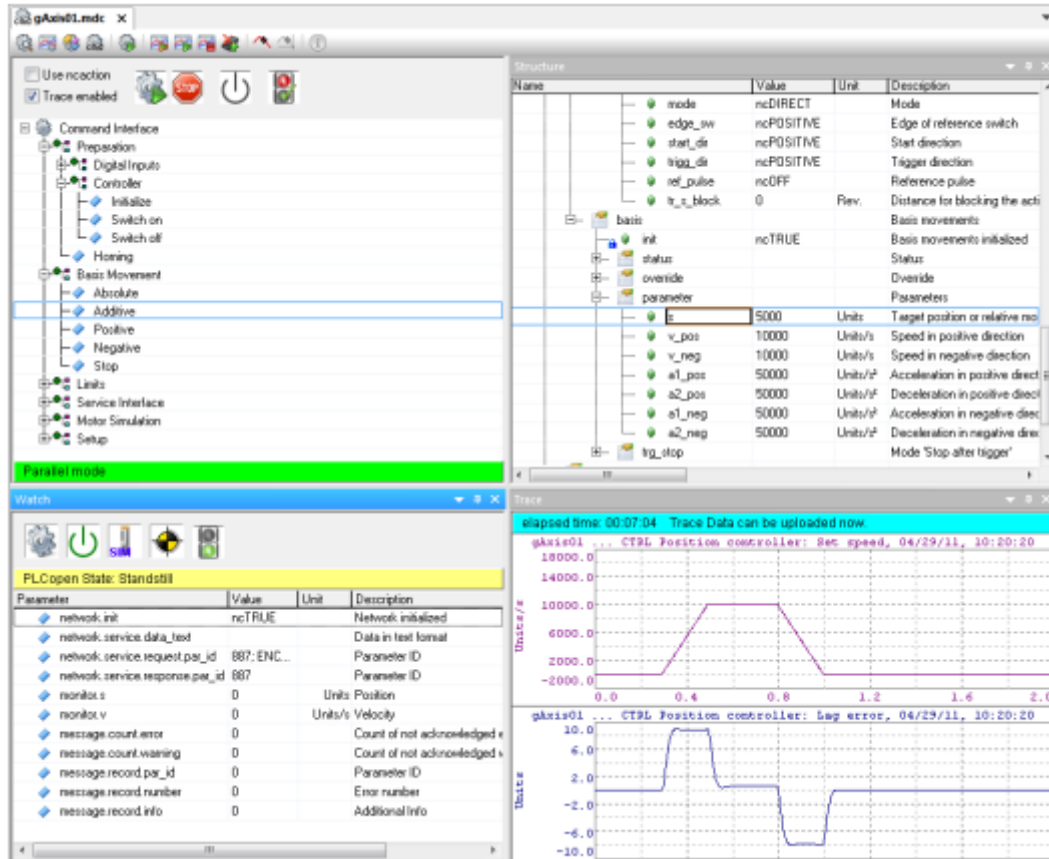
Správnosť konfigurácie a komunikácie si vieme overiť pomocou funkcie **NC Test** pre servomotor, ktorú si môžeme spustiť v okne položky **Physical View** pravým kliknutím myši na ikonu motora a výberom položky **NC Test**. Následne sa zobrazí testovacie okno, ktoré je sprevádzané zobrazením výstrahy (Obr. 27), ktorá nás upozorňuje na dodržiavanie bezpečnostných pravidiel.



Obr. 27 Výber módu NC testu

V zobrazenom okne si môžeme vybrať jeden z dvoch módov: **Parallel mode** alebo **Exclusive mode**. Tieto módy fungujú rovnako, rozdiel je v tom, že v paralelnom móde sa každá vykonaná zmena a prepísaná hodnota automaticky ukladá.

Po výbere módu sa nám zobrazia 4 okná uložené vedľa seba (Obr. 28).



Obr.28 Zobrazenie testovacích okien NC testu

Prvé okno obsahuje príkazy, ktorých spúšťaním vykonávame nastavenia pohonu a vieme ho uviesť do pohybu.

Napravo od neho je okno **Structure**, kde sú nastavené predvolené parametre pohonu, ktorých zmenou ovládame rýchlosť pohonu, jeho zrýchlenie atď.

Dole sa nachádza okno **Watch**. V tomto okne sa nedá nič meniť, slúži na zobrazovanie aktuálneho stavu, niektorých hodnôt, ako poloha, rýchlosť, číslo chyby, počet chýb, ktoré zabraňujú spusteniu pohonu atď.

Posledné okno je **Trace**, slúži na vykresľovanie grafov sledovaných hodnôt. Počet a mierku grafov si vieme meniť, rovnako ako aj výber sledovaných hodnôt.

Pre pohyb motora používame nasledujúce funkcie:

- V **Command Interface** je zložka **Preparation**, ktorá obsahuje podzložku **Controller**, kde vieme zapnúť a vypnúť pohon.
- Ďalej je potrebné spustiť príkaz **Homing**, ktorý pošle motoru parametre nastavené v okne **Structure**.
- V zložke **Basis Movement** máme na výber zo 4 druhov pohybov a možnosť zastavenia pohonu.

Pri prvom uvedení pohonu do pohybu je jeho otáčanie veľmi hlučné.

Tento problém je spôsobený nesprávnym naladením pohonu a vieme ho vyriešiť nasledovne:

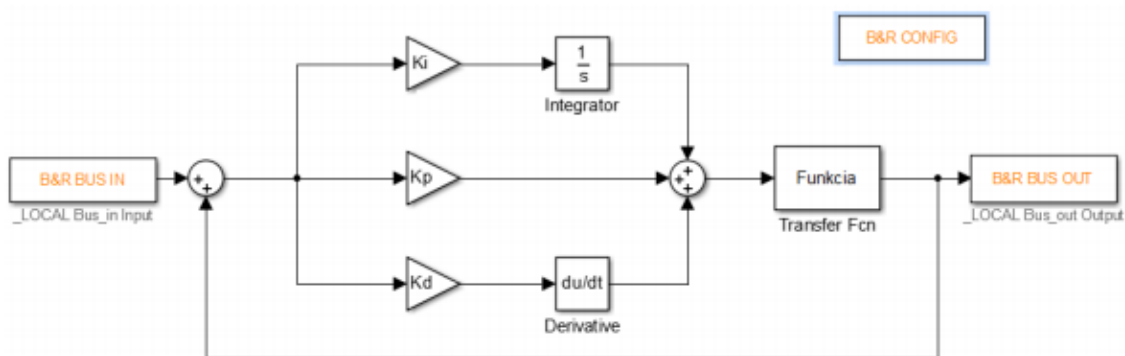
- v zložke **Setup** a jej podzložke **Contoller Autotuning** vyberieme položku **Start tuning**.
- V okne **Structure** sa nám zobrazia parametre spojené so správnym naladením motora (Obr. 29). Na výber je tu viacero módov, pre nás sú však dôležité módy **ncSPEED** (rýchlosť), **ncPOSITION** (poloha) a **ncTEST**.
- Vykonanie ladenia pre jednotlivé módy potvrdíme dvojklikom na položke **Start tuning**.
- Zrealizovanie jednotlivých príkazov je ohlásené cvaknutím motora. Po dokončení ladenia a opätovnom spustení pohonu je jeho chod už nehlučný.

Name	Value	Unit	Description
controller			Controller
status			Status
parameter			Parameters
mode			Mode
orientation			Orientation
i_max_percent		%	Maximum percentage for rated current
v_max_percent		%	Maximum percentage for speed
s_max		Units	Maximum move distance
ds_max		Units	Maximum lag error
isq_ripple			ISQ-Ripple
monitor			Monitor
message			Messages (errors, warnings)
nc_test			NC Test

Obr.29 Výber módu pre automatické ladenie pohonu

6.2 Realizácia PID regulátora

Pre reguláciu požadovanej polohy lopty použijeme PID regulátor. Regulátor si namodelujeme v programe Simulink, doplníme funkčné bloky (bloky pre definovanie vstupov a výstupov a blok pre nastavenie konfigurácie, t.j. generovanie cieľového kódu) pre použitie toolboxu **Automatic Studio Target for Simulink**, pomocou ktorého pretransformujeme PID regulátor do cieľového kódu použiteľného v Automatic Studio (Obr. 30).



Obr.30 Realizácia PID regulátora v Simulinku s využitím toolboxu Automatio Studio Taget for Simulink

Vygenerovaný kód musíme ďalej upraviť. Je potrebné vytvoriť nové premenné a vytvoriť podprogram na zaznamenávanie signálu z ultrazvukového snímača. Hodnota snímača je zaznamenávaná v rozmedzí od 0 po 32767 jednotiek, čo je potrebné previesť do metrickej sústavy, aby sme si vedeli presne v milimetroch určiť požadovanú polohu lopty.

Potom loptu položíme na koleso tak, aby bola v pokoji. Zaznamenáme hodnotu zo snímača a nastavíme ju ako želanú hodnotu regulácie pod názvom **offset** (Obr. 31).

```

ACTION act_analogProcessing:

    analog.ENABLE := TRUE;
    analog.IN := A0_ST2.ai1;
    analog.IN_HI_HIM := 32767;
    analog.IN_LO_LIM := 0;
    analog.PHYS_LO_LIM := 100;
    analog.PHYS_HI_LIM := 700;
    analog();

END_ACTION

```

Obr.31 Podprogram pre ultrazvukový snímač

Vytvorený podprogram pre ultrazvukový snímač potom zakomponujeme do hlavného programu.

Pre spustenie regulácie fyzikálneho modelu BALLBAL je ďalej potrebné povoliť ovládanie kolesa, nastaviť hodnoty P, I, D regulátora, stanoviť maximálnu a minimálnu rýchlosť a vytvoriť cyklus pre nepretržitý chod programu (Obr. 32).


```

PROGRAM _CYCLIC

  (* Call variable *)
  AO_ST2;AO_ST3;

  gAlarm;
  gAlarmImg;

  (* Call action *)
  act_analogProcessing;

  (* *)
  motionCtrl.Enable := 1;

  pid.SetValue := offset;
  pid.ActValue := analog.Out;

  pid.Parameter.Gain := 5;
  pid.Parameter.IntegrationTime := 0.2;
  pid.Parameter.DerivativeTime := 0.5;

  pid.Parameter.MinOut := -2200;
  pid.Parameter.MaxOut := 2200;

  motionCtrl.MpLink := ADR(gAxisBasicLink);
  motionCtrl.Axis := ADR(gAxis01);
  motionCtrl.Parameters := ADR(axisMotionPar);

  motionCycle.MpLink := ADR(gAxisBasicLink);
  motionCycle.Parameters := ADR(axisPar);
  motionCycle.Velocity := pid.Out;

  (* Call FB *)
  pid();
  motionCtrl();
  motionCycle();

END_PROGRAM

```

Obr.32 Výsledný program pre reguláciu polohy loptičky

Po nahratí programu do PLC je potrebné spustiť jednotlivé funkcie, ako zapnutie pohonu, a aktiváciu PID regulátora. Jeho funkčnosť si overíme najprv pri nízkych rýchlostiach pohybom ruky pred snímačom. Pri pohybe ruky blízko pri snímači sa koleso točí v zápornom smere (proti smeru hodinových ručičiek). Pri vzdiaľovaní ruky od snímača (od želanej hodnoty regulácie-offset) sa pohon zastaví a jeho smer rotácie sa zmení na kladný. Týmto overíme funkčnosť

Ďalej je potrebné správne nastaviť parametre PID regulátora, rýchlosť otáčania kolesa v kladnom/zápornom smere a želanú hodnotu regulácie (offset).

Výsledok správne nastavenej regulácie, t.j. zotrvanie lopty na želanej polohe a jej návrat do tejto polohy aj po vychýlení kolesa je na Obr. 33.



Obr.33 Regulácia polohy lopty na fyzikálnom modeli BALLBAL